

## 静的コーン貫入試験による有明粘土地盤の 原位置強度について

甲 本 達 也・加 来 研

(農業造構学教室)

昭和 55 年 11 月 10 日 受理

### Measurement of In-situ Shearing Strength of Ariake Clay Ground by Static Cone Penetration Test

Tatsuya KOUMOTO and Ken KAKU

(Laboratory of Construction Engineering)

Received November 10, 1980

#### Summary

The applicability of the static cone penetration test to the measurement of the in-situ shearing strength of the Ariake clay ground was investigated. The bearing capacity factor ( $N_{cr\alpha}$ ) of the usual cone whose semi-angle was  $15^\circ$  and surface was considered as rough, was calculated under the condition of deep penetration (the depth/width ratio of cone,  $D_p/2R \geq 1.33$ ) and the condition that the angle of internal friction ( $\phi$ ) was equal to zero. It was 11.5 when the intermediate principal stress was equal to the mean principal stress, and it was 12.0 when the intermediate principal stress was equal to the minor principal stress. Using the average value of them as the bearing capacity factor, the undrained shearing strength ( $c_u$ ) of the Ariake clay ground will be calculated by the following equation, in which  $I_c$  is the cone index.

$$c_u = \frac{I_c}{N_{cr\alpha}} = \frac{I_c}{11.8} \quad (D_p/2R \geq 1.33)$$

Using the values of cone index which were obtained by the static cone penetration test on the Ariake clay ground, the values of  $c_u$  were calculated. These values were smaller than the values of in-situ vane strength ( $\tau_v$ ) and larger than the half values of unconfined compressive strength ( $q_u/2$ ).

The static cone penetration test may be used as a convenient measuring method of the shearing strength of such sensitive clay ground as the Ariake clay, if the in-situ vane strength is considered to represent the real value of shearing strength of it.

#### 緒 言

静的コーン貫入試験（以下単に貫入試験と呼ぶ）法とは先端角（ $2\alpha$ ）が主に  $30^\circ$  と  $60^\circ$  の鉄製コーンを 1 cm/s の速度で土中へ貫入したときの貫入抵抗  $P$  をコーン底部断面積  $A_c$  で除した値をコーン指数  $I_c$  ( $=P/A_c$ ) で表わし、 $I_c$  でもって地盤の硬軟を表示する方法である。

既に、攪乱粘土については  $I_c$  から粘土の非排水せん断強度  $c_u$  を算定できることを理論的に、また実験的（室内）に明らかにした<sup>1)</sup>。本論では粘土の原位置強度測定法としての貫入試験法の

適用性を有明粘土地盤について調査解析したものである。

### コーン支持力係数 $N_{cr\alpha}$ の算定

$I_c$  と  $c_u$  との間にはコーン支持力係数  $N_{cr\alpha}$  を介して次の関係がある。

地表面貫入の場合：

$$I_c = c_u \cdot N_{cr\alpha}$$

地盤内貫入の場合：

$$I_c = c_u \cdot N_{cqr\alpha}$$

$$= c_u \cdot N_{cr\alpha} \quad (\text{コーン先端のスベリ線が貫入壁に達する場合})$$

.....(1)

(1) 式中の  $N_{cr\alpha}$  や  $N_{cqr\alpha}$  の値が計算されておれば  $I_c$  の値から容易に  $c_u$  を求めることができる。以下に  $N_{cr\alpha}$  及び  $N_{cqr\alpha}$  の算定法と算定結果について述べる。

三次元軸対称の場合、 $(r, z)$  平面における  $s_1$  スベリ線と  $r$  軸とのなす角を  $\theta$  とすると  $\phi=0$  では特性曲線の方法は次式

$$\frac{dz}{dr} = \tan \theta \text{ or } -\cot \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

で与えられ、基礎方程式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\sigma_m/c)}{ds_1} - 2 \frac{d\theta}{ds_1} &= \frac{\gamma}{c} \sin \theta + \frac{A}{r} \\ \frac{d(\sigma_m/c)}{ds_2} + 2 \frac{d\theta}{ds_2} &= \frac{\gamma}{c} \cos \theta + \frac{B}{r} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし  $\sigma_m$  は平均主応力 ( $=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ ,  $\sigma_1$  は最大主応力,  $\sigma_3$  は最小主応力を表わす),  $c$  は粘着力,  $\gamma$  は土の単位体積重量,  $A$  および  $B$  は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 = \sigma_m \text{ の場合: } A &= \sin \theta, B = -\cos \theta \\ \sigma_2 = \sigma_3 \text{ の場合: } A &= B = \sin \theta - \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

(2) 式及び (3) 式を差分化し下記の境界条件を用いて数値積分するとコーン周辺のスベリ線網とコーン表面の接地圧及びせん断応力が得られる。境界条件は Fig. 1 に示す土中へ貫入されたコーン周辺の塑性域図において次のように与えられる。i)  $AB$  上:  $\theta = -\left(\frac{\pi}{2} + \omega - \eta\right)$ ,  $z = -(r-1.0) \tan \omega$ ,  $\sigma_m/c = \sigma_{03}/c + \sin 2\eta$ , ii) 点  $A$ : 点  $A$  の分割数を  $N$ , コーン先端半角を  $\alpha$  とすると, コーン表面が滑な場合  $\theta_i = -\left(\frac{\pi}{2} + \omega - \eta\right) + \left(\frac{\pi}{4} + \alpha + \omega - \eta\right)i/N$ , 粗な場合  $\theta_i = -\left(\frac{\pi}{2} + \omega - \eta\right) + \left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \omega - \eta\right)i/N$ ,  $(\sigma_m/c)_i$  はいずれの場合も  $(\sigma_m/c)_i = 2\theta_i + \sin 2\eta + 2\left(\frac{\pi}{2} + \omega - \eta\right)$ , iii)  $AE$  上:  $OA (=R) = 1.0$ ,  $z = (1.0-r) \cot \alpha$ ,  $\theta$  はコーン表面が滑な場合  $\theta = -\frac{\pi}{4} + \alpha$ ,  $\zeta = \frac{\pi}{4}$ , 粗な場合  $\theta = \alpha$ ,  $\zeta = 0$ 。

ただし  $\omega$  は  $AB$  面が  $r$  軸となす角,  $\sigma_{03}$  及び  $s_{03}$  は  $AB$  面より上部の土塊により引き起こされる三次元状態における応力でそれぞれ次式で与えられる。

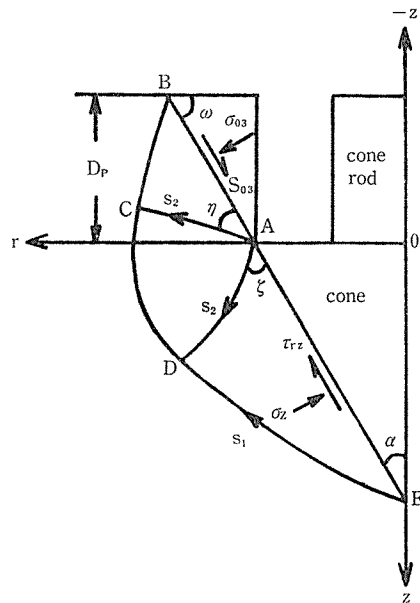


Fig. 1. Shape of Plastic region around the cone when the penetration depth is  $D_p$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{03}}{c} &= \frac{\gamma}{c} \cdot \frac{D_p(3 \tan \omega + D_p)}{3(2 \tan \omega + D_p)} \cos^2 \omega \\ \frac{s_{03}}{c} &= \frac{\sigma_{03}}{c} \tan \omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

また  $\eta$  は Fig. 1 の BC 及び AC を直線と仮定すると  $\triangle ABC$  についての応力のつり合いより容易に次式から求められる。

$$\eta = \frac{1}{2} \cos^{-1} m \dots\dots\dots(6)$$

ただし  $m$  は Meyerhof<sup>2)</sup> により AB 面（等価自由表面）上におけるせん断強度の稼働率と定義されたもので次式より決定される。

$$m = \frac{s_{03}}{c} \dots\dots\dots(7)$$

またコーン表面のせん断応力 ( $\tau_{rz}/c$ ) は  $\zeta$ （コーン表面の粗度に関する角度）を用いて、

$$\frac{\tau_{rz}}{c} = \cos 2\zeta \dots\dots\dots(8)$$

で与えられるので、コーン表面が滑な場合は  $\tau_{rz}/c = \cos 2\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0$ 、粗な場合は  $\tau_{rz}/c = \cos 2(0) = 1.0$  となる。

コーン支持力係数  $N_{cr\alpha}$  及び  $N_{cqr\alpha}$  はコーン表面の接地圧の平均値  $(\sigma_z/c)_{\text{mean}}$  とせん断応力  $\tau_{rz}/c$  を用いて次式により算定される。

$$N_{cr\alpha}, N_{cqr\alpha} = \left( \frac{\sigma_z}{c} \right)_{\text{mean}} + \frac{\tau_{rz}}{c} \cot \alpha \dots\dots\dots(9)$$

Fig. 2 は貫入試験に用いられる  $\alpha = 15^\circ$  コーンについて、コーン表面を粗と仮定した場合の計算結果を示したものである。いずれも図の左側は  $\sigma_2 = \sigma_m$  の場合、右側は  $\sigma_2 = \sigma_3$  の場合のものである。これらによれば貫入が進むにつれ ( $\omega$  が増大するにつれ) てコーン周辺の塑性域が拡大してゆき、コーン表面の接地圧が増大してゆく様子がよく分る。

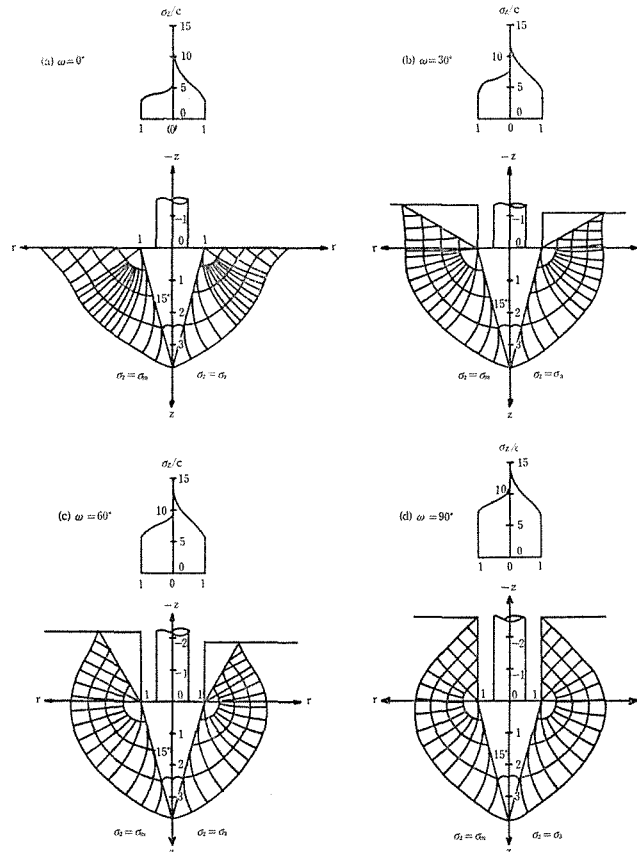
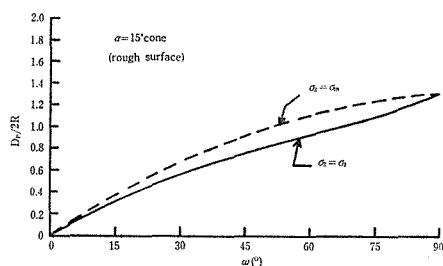
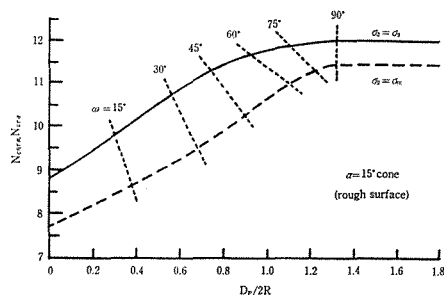


Fig. 2. Calculated slip line nets around cones and contact pressure ( $\sigma_z/c$ ) on cone surfaces.

実際にはコーン貫入の進行は貫入深さ ( $D_p$ ) 又はコーンの貫入幅比 ( $D_p/2R$ ) で表示されるので  $D_p$  又は  $D_p/2R$  と  $\omega$  との関係を知る必要がある。Fig. 3 は  $D_p/2R$  と  $\omega$  との関係を示したものであるがこれによれば  $0^\circ < \omega < 90^\circ$  の範囲においては中間主応力  $\sigma_2$  を  $\sigma_2 = \sigma_m$  と仮定して得られる  $D_p/2R$  の値は  $\sigma_2 = \sigma_3$  と仮定して得られる  $D_p/2R$  の値より大き目であることが分る。

いまコーン表面を粗と仮定した場合について (9) 式を用いて算定したコーン支持力係数 ( $N_{era}$ ,  $N_{eqra}$ ) を  $D_p/2R$  に対して示したものが Fig. 4 である。図において  $N_{era}$  は  $\omega = 0^\circ$  ( $D_p/2R = 0$ ) と  $\omega = 90^\circ$  に対するもので、 $N_{eqra}$  は  $0^\circ < \omega < 90^\circ$  に対するものである。これによれば  $N_{eqra}$  は貫入が進むにつれ ( $\omega$  が増大するにつれ) 増大してゆき、いずれの中間主応力の場合も  $D_p/2R$  が約 1.33 で一定値 ( $\sigma_2 = \sigma_m \cdots N_{era} = 11.5$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 \cdots N_{era} = 12.0$ , 平均値  $\cdots N_{era} = 11.8$ ) に達する。従って  $D_p/2R \geq 1.33$  の深さでは粘土の非排水せん断強度  $c_u$  は次式より求められる。

$$c_u = \frac{I_c}{N_{cr\alpha}} = \frac{I_c}{11.8} \quad \left( \frac{D_p}{2R} \geq 1.33 \right) \quad \dots\dots\dots(10)$$


 Fig. 3. Relation between the values of  $D_p/2R$  and the values of  $\omega$ .

 Fig. 4. Calculated values of the bearing capacity factor of cone for  $\phi=0$ 

### 実験及び結果

貫入試験は佐賀県内の南川副、江北、牛津の各地区（いずれも有明粘土地帯）で実施した。実験には  $\alpha=15^\circ$ 、 $A_c=6.45 \text{ cm}^2$  のコーンを用い、貫入速度は  $v_s=0.4 \text{ cm/s}$  の定速とした。南川副、

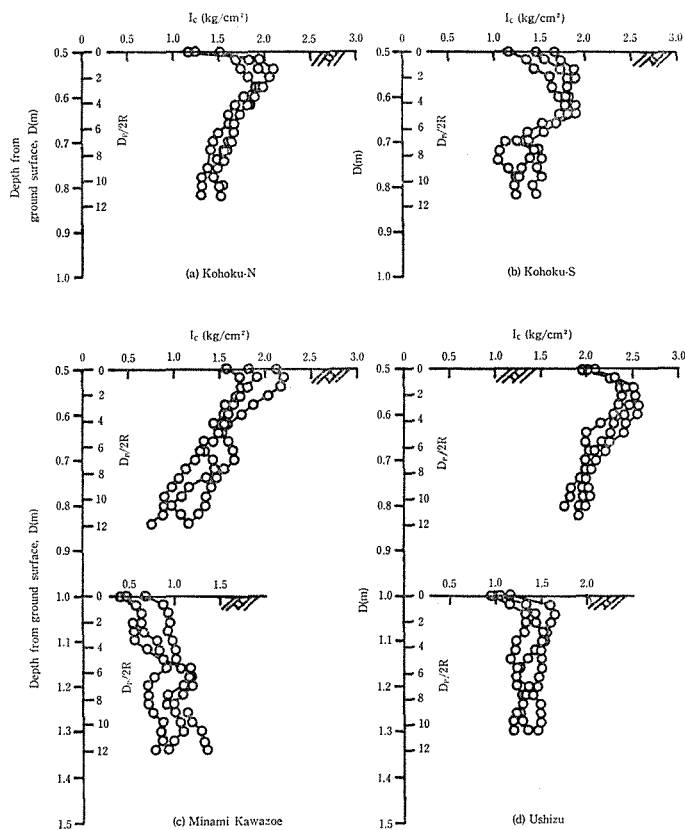


Fig. 5. Results of the static cone penetration test on the Ariake clay ground.

牛津地区では貫入試験機の貫入深さに制限があるため、0.5 m 毎に 1.0 m の深さまで土層を掘削し、各層について貫入試験を行った。同時に原位置ベーンセン断試験と不攪乱試料のサンプリングを行い、サンプリング試料については室内で一軸圧縮試験を行った。

Fig. 5 は各地区において得られた貫入試験結果を示したものである。南川副、牛津地区においては 0.5 m 毎に土層を掘削して貫入試験を行っているので  $I_c \sim D$  関係に不連続な領域が生じているが、これは外挿補間により連続することが容易に確認できよう。

### 考察及び結論

Fig. 6 は (10) 式より求めた  $c_u$  の値と原位置ベーンセン断強度  $\tau_v$  及び一軸圧縮強度  $q_u$  の  $\frac{1}{2}$  との対比を行ったものである。これによれば (10) 式より求めた  $c_u$  は  $\tau_v$  よりは小さ目の (安全側の)、 $q_u/2$  よりは大き目の (危険側の) 値であることが分る。しかし  $\tau_v$  の大きい地盤ほど  $c_u$  も大きくなっているのに対し、 $q_u/2$  は  $\tau_v$  や  $c_u$  に対して比例的に増大していない。これは有明粘土が鋭敏な粘土であり、 $q_u$  を求める際の試料の乱れによる強度低下が原因しているとも考えられる。これにより  $q_u$  を求める際にはどうしても試料は乱れを受けるものであり、 $\tau_v$  が現在のところ粘土地盤の原位置強度を代表するものと考えらるならば貫入試験法は有明粘土のような鋭敏な粘土地盤の原位置強度測定法として適しているといえよう。

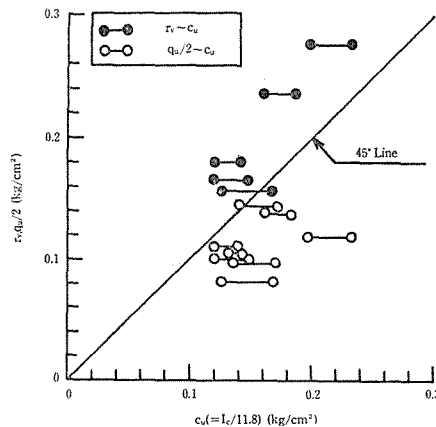


Fig. 6. Comparison of the values of  $\tau_v$  and  $q_u/2$  with the values of  $c_u$  obtained from the static cone penetration test.

### 摘 要

本研究は静的コーン貫入試験法の原位置強度測定法としての適用性を有明粘土地盤について検討したものである。通常用いられるコーン先端半角が  $15^\circ$  でコーン表面が粗とみなされるコーンの支持力係数 ( $N_{cr\alpha}$ ) を内部摩擦角 ( $\phi$ ) を 0 とし深い貫入状態 (コーンの貫入幅比  $D_p/2R \geq 1.33$ ) に対して算定した。これによれば中間主応力が平均主応力に等しい場合、 $N_{cr\alpha} = 11.5$  であり、中間主応力が最小主応力に等しい場合  $N_{cr\alpha} = 12.0$  であった。従ってこれらの平均値  $N_{cr\alpha} = 11.8$  を用いると粘土地盤の非排水せん断強度  $c_u$  は次式より算定される。

$$c_u = \frac{I_c}{N_{cr\alpha}} = \frac{I_c}{11.8} \quad (D_p/2R \geq 1.33)$$

ただし  $I_c$  はコーン指数である。

有明粘土地盤において静的コーン貫入試験より求めたコーン指数の値から上式を用いて  $c_u$  の値を算定した。算定値は原位置ベーンセン断強度 ( $\tau_v$ ) より小さく、一軸圧縮強さの半分 ( $q_u/2$ ) より大きかった。これより、現在のところ原位置ベーンセン断強度が粘土地盤の原位置における真の強度を代表するものと考えらるならば静的コーン貫入試験法は有明粘土のような鋭敏な粘土地盤の原位置強度測定法として適しているといえよう。

## 謝 辞

現地試験にご協力頂いた九州農政局筑後川下流農業水利事業所、石炭鉱害事業団佐賀事業所に謝意を表します。なお本研究は文部省科学研究費（総合（A））、代表者 藤川武信 教授）の補助を受けて行ったものである。

## 引 用 文 献

- 1) 甲本達也 (1980). 粘性土地盤におけるコーンの貫入に関する塑性論的研究. 佐賀大農薬48. 1-63.
- 2) Meyerhof, G. G. (1951). The Ultimate Bearing Capacity of Foundations. Geotechnique II-4: 301-332.